



# Результаты пулковских базисных наблюдений покрытия звезды TYC 1932-469-1 астероидом 87 Sylvia 29 октября 2019

Д.А. Бикулова<sup>1</sup>, А.Х. Алиев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ГАО РАН

## Аннотация

29 октября 2019 в Пулковской обсерватории на метровом зеркальном телескопе «Сатурн» велись наблюдения покрытия звезды TYC 1932-469-1 (Gaia DR3 source id = 679856115656562048) астероидом 87 Sylvia. Параллельно проводилась съемка астероида 87 Sylvia с помощью телескопа МТМ-500М, расположенного на Горной астрономической станции ГАО РАН, где наблюдалось видимое тесное сближение. На данном примере в статье рассматривается возможность повышения точности наземных астрометрических наблюдений и получения «мгновенных» параллаксов с целью уточнения эфемерид путём базисных наблюдений покрытий и видимых тесных сближений. В статье продемонстрировано, что метод позволяет получать точности определения координат порядка 0.010 arcsec, что в данном случае даёт оценку параллакса астероида с точностью 0".03 arcsec. Сравнение с существующими эфемеридами показало высокую степень сходимости.

## Введение

Наблюдения покрытий звезд астероидами крайне информативны для астрономии в целом. Кроме очевидной возможности с космической точностью определить положение астероида для определенного момента времени и использовать это для задач астрометрии и динамики тел Солнечной системы, появляется возможность довольно точно определить размер и проекцию фигуры астероида (для этого нужны наблюдения из десятков пунктов, распределенных по земной поверхности). По кривой блеска можно попытаться выявить возможную двойственность астероида или звезды. К слову, именно покрытие астероидом 87 Sylvia звезды BD +29 1748 в 2006 году позволило детектировать ее двойственность (Lin и др., 2009). Также интерес с точки зрения повышения точности имеющихся данных представляют и наблюдения видимых тесных сближений астероидов со звездами высокоточных каталогов. Преимущество данного метода заключается в большей массовости получаемых данных. Совместные же наблюдения покрытий и видимых тесных сближений из разных пунктов позволяют, как показано далее, получить дополнительные параметры, например, расстояние до астероида.

## 1 Покрытие звезды TYC 1932-469-1 астероидом 87 Sylvia

К настоящему моменту накоплены кривые блеска уже для нескольких покрытий звезд астероидом 87 Sylvia. Событие 29 октября 2019 года вызвало значительный интерес (Wünsche, 2020), так как полоса покрытия для события проходила через западную Европу, где располагается относительно большое число обсерваторий (карта полосы покрытия представлена на рис. 1). В результате было накоплено большое число кривых блеска<sup>1</sup>, включая покрытия спутниками астероида. Благодаря наблюдениям на больших телескопах известно, что астероид 87 Sylvia

<sup>1</sup><http://www.euraster.net/results/2019/index.html#1029-87>

87 Sylvania #1 occults TYC 1932-00469-1 on 2019 Oct 29 from 23h 38m to 23h 49m UT

Star:	Max Duration = 23.0 secs	Asteroid: (in DAMIT, ISAM)
Mag V = 10.1	Mag Drop = 3.3 (0.0r)	Mag = 13.3
RA = 9 21 1.7489 (BCRS)	Sun : Dist = 98°	Dia = 286km
Dec = 25 57 43.125	Moon: Dist = 119°	Parallax = 2.544"
[of Date: 8 22 12, 25 53 53]	illum = 5 %	Hourly dRA = 1.296s
Prediction of 2019 Oct 15.0	E 0.012"± 0.006" in PA 96	dDec = 3.53"

2 moons. (Romulus) 11km at 1351km, Period 3.654days, (Remus) 11km at 702km, Period 1.378days Orbit@Miriade

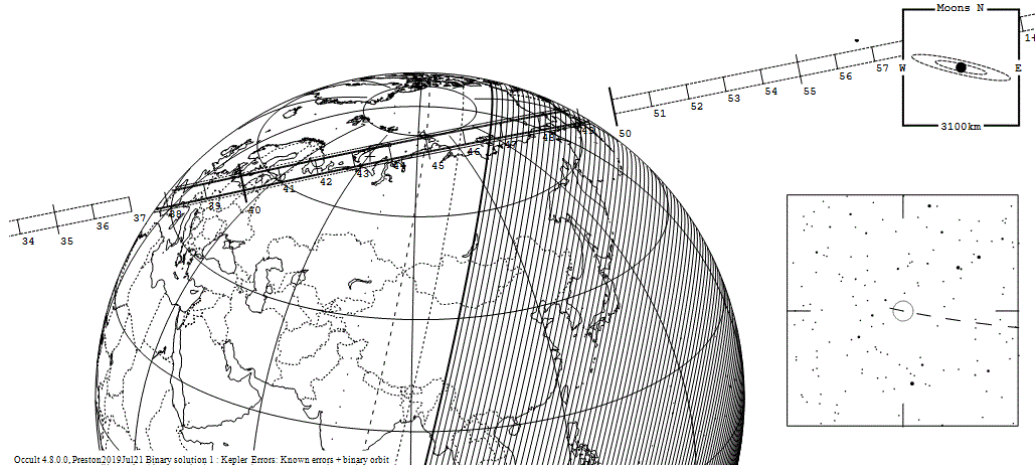


Рис. 1: Карта полосы покрытия звезды TYC 1932-469-1 астероидом 87 Sylvania 2019-10-29.

( $385 \times 265 \times 230 \pm 10$  км) имеет два спутника – Romulus ( $\approx 18$  км) и Remus ( $\approx 7$  км), имеющие большие полуоси орбит  $1365 \pm 5$  км и  $706 \pm 5$  км соответственно.

В Пулковской обсерватории наблюдения велись на телескопе «Сатурн» (табл. 1). Погодные условия в момент покрытия были весьма сложными (проходящая облачность). Это не позволило вести съемку с нужной частотой. Кадры вблизи покрытия представлены на рис. 2. Время накопления сигнала на телескопе «Сатурн» составляло 2 секунды. Звезда TYC 1932-469-1 (Gaia DR3 source id = 6798561115656562048) достаточно яркая ( $G_{\text{mag}} = 9.89$ ), в то время как астероид в момент покрытия был слабее 13-ой звездной величины. Соседние звезды, играющие роль звезд сравнения для построения кривой блеска, также имели блеск от 11 до 13 звездной величины. Из-за значительного (свыше 2 mag) различия яркости наблюдаемых объектов, для получения астрометрического результата, временное разрешение при съемке было снижено.

Таблица 1: Характеристики телескопа «Сатурн»

D (м)	F (м)	Камера	FOV	Масштаб
1	4	ZWO ASI1600 Pro	$13' \times 10'$	172 mas/pix

Кривая блеска, полученная на телескопе «Сатурн», показана на рис. 3. Для определения разности между блеском звезды до покрытия и блеском пары звезда+астероид в момент покрытия проводилась зарекомендовавшая себя в предыдущих работах (Khovrichiev и др., 2018) шейплет-декомпозиция изображений TYC 1932-469-1 и звезд сравнения на всех ПЗС-кадрах. Таким образом были вычислены потоки в инструментальной шкале ( $F_s$  для покрываемой звезды,  $F_r$  – для звезд сравнения) и найдена разность звездных величин  $\Delta mag = -2.5 \lg(F_s/F_r)$ . Анализ кривой блеска привел к тому, что центральная фаза явления пришлась на момент UTC = 2019-10-29T23:40:48.2 $^{+1.6c}_{-1.0c}$  (MJD=58785.986669). Падение блеска составило  $\Delta mag = 3.26 \pm 0.08$ . Сравнительно невысокие точности обусловлены упомянутыми ранее погодными условиями. В бо-



Рис. 2: ПЗС-кадры вблизи момента покрытия ТYC 1932-469-1 астероидом 87 Sylvia 2019-10-29.

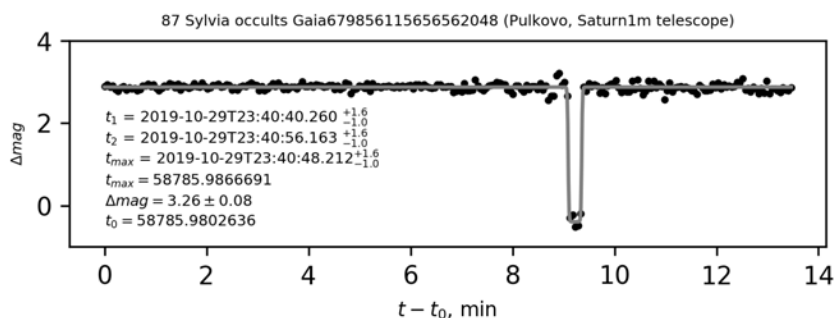


Рис. 3: Кривая блеска для покрытия звезды ТYC 1932-469-1 астероидом 87 Sylvia 2019-10-29.

лее подходящих условиях современные телескопы и камеры позволяют достичь гораздо лучших результатов.

После покрытия было получено несколько сотен ПЗС-кадров ради определения координат астероида. Диаграмма движения 87 Sylvia по результатам этих наблюдений представлена на рис. 4. На таком коротком интервале времени движение астероида главного пояса естественно представить линейной моделью. Это позволяет формально определить центральный момент покрытия как момент времени, когда угловое расстояние «звезда – астероид» достигает минимума. Этот момент соответствует UTC = 2019-10-29T23:40:48.5±1.4 с (MJD = 58785.9866727), что хорошо согласуется с результатом, вытекающим из фотометрической кривой. Для определения ориентировки кадров и их масштаба были отобраны несколько звезд, расположенных на минимальных угловых расстояниях от звезды с которой происходило сближение и методом шести постоянных определены «локальные» масштаб и поворот кадра. По итогам вычислений разности положений фотоцентра астероида и звезды в момент покрытия составляют  $\Delta\alpha = 0.003 \pm 0.005$  arcsec,  $\Delta\delta = -0.014 \pm 0.004$  arcsec. Отметим, что длина хорды астероида при покрытии в Пулкове составила  $0.029 \pm 0.007$  arcsec. То есть, разности координат значительно меньше угловых размеров астероида.

## 2 Наблюдения видимого тесного сближения астероида 87 Sylvia со звездой ТYC 1932-469-1 в ГАС ГАО РАН

Параллельно с наблюдениями в Пулковской обсерватории проводилась съемка астероида 87 Sylvia с помощью телескопа МТМ-500М (табл. 2), расположенного на Горной астрономической станции ГАО РАН. Полоса покрытия проходила весьма далеко от этой обсерватории, поэтому наблюдалось видимое тесное сближение 87 Sylvia со звездой ТYC 1932-469-1.

В нижней части рис. 4 показан трек астероида относительно звезды для ГАС ГАО РАН. Относительные положения звезда ТYC 1932-469-1 - астероид 87 Sylvia (табл. 3) на моменты соответствующих событий дают оценку «мгновенного» параллакса астероида относительно базы

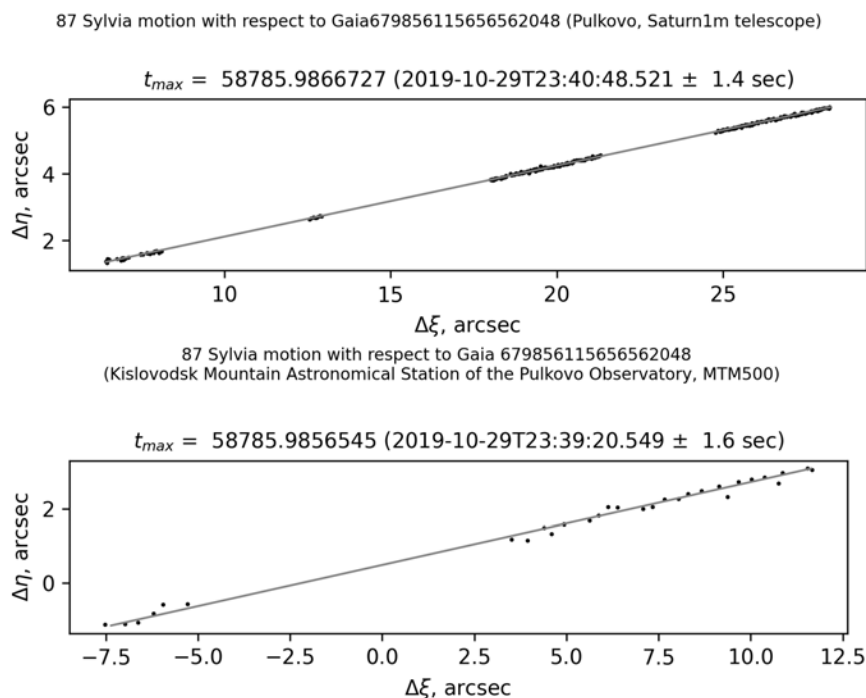


Рис. 4: Треки астероида 87 Sylvia относительно звезды ГYC 1932-469-1 астероидом вблизи момента покрытия для телескопа «Сатурн» (вверху) и МТМ-500М (ГАС ГАО РАН) (внизу).

Таблица 2: Характеристики телескопа МТМ-500М

D (мм)	F (мм)	Камера	FOV	Масштаб
500	4100	SBIG STX-16803	31'×31'	1350 mas/pix

Пулковко – ГАС ГАО  $\varpi = 0.727 \pm 0.030$  arcsec.

Таблица 3: Относительные положения астероида 87 Sylvia

Момент времени	$\Delta\alpha$ (arcsec)	$\Delta\delta$ (arcsec)
Центральный момент покрытия звезды в Пулковской обсерватории	$0.255 \pm 0.031$	$0.680 \pm 0.022$
Момент достижения минимального углового расстояния для ГАС ГАО РАН соответствует UTC 2019-10-29T23:39:20.549±1.6 с. (MJD = 58785.9856545)	$-0.105 \pm 0.049$	$0.469 \pm 0.030$

Несложно вычислить эфемериды явления для Пулковской обсерватории на основе сервисов JPL's HORIZONS<sup>2</sup> и Miriade (IMCCE)<sup>3</sup> и получить соответствующие величины «мгновенных» параллаксов астероида относительно базы Пулковко – ГАС ГАО (табл. 4). Для JPL's HORIZONS это расхождение формально нельзя считать значимым.

Сравнения результатов наблюдений с эфемеридами рационально дополнить тем, что при улучшении эфемерид используются данные самых разнообразных наблюдений, которые, естественно, характеризуются случайными ошибками. Разработчики NASA JPL HORIZONS попытались

<sup>2</sup><https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>

<sup>3</sup><https://ssp.imcce.fr/webservices/miriade/>

Таблица 4: «Мгновенные» параллаксы и О-С на основе web-сервисов

Сервис	$\varpi$	О-С
JPL's HORIZONS system	0.710 arcsec	$0.017 \pm 0.030$ arcsec
Miriade (IMCCE)	0.705 arcsec	$0.022 \pm 0.030$ arcsec

учесть это и дать оценку точности своих эфемерид. Для изучаемого астероида оценки стандартных ошибок эфемерид составили  $0.014$  arcsec  $0.004$  arcsec по обеим координатам. Как видно из анализа, наблюдения покрытия, в данном случае, обеспечили точности, близкие к тем, что могут дать текущие эфемериды, основанные на всех доступных наблюдениях.

## Заключение

Для околоземных астероидов довольно существенна проблема низкого качества эфемерид (особенно сразу после открытия). Обычно это связано с недостаточным количеством наблюдений, поскольку чтобы получить оценки первых двух производных от экваториальных координат астероида и воспользоваться методами Лапласа или ПВД, необходимо накапливать довольно большой ряд.

При ранее проводившихся базисных наблюдениях АСЗ (Eggl и др., 2014), (Devyatkin и др., 2016) полученные результаты не достигали желаемой точности по причине низких значений блеска АСЗ и, как следствие, невысокого отношения сигнал/шум (SNR), требующего увеличения экспозиции, которое в совокупности с высокой угловой скоростью, к тому же, приводило к необходимости использования более сложной модели изображения объекта (трек объекта + PSF). В нашем случае все измерения велись относительно звезды, для которой наблюдалось покрытие — без непосредственного вычисления экваториальных координат астероида. Также для прогресса базисных наблюдений АСЗ желательно вести измерения при покрытиях и видимых сближениях со звездами Gaia либо с использованием узкополосных фильтров, либо с попеременным использованием фильтров с существенной разностью эффективной длины волны (для учета атмосферной дисперсии) — это избавит от трудноучитываемых систематических ошибок.

Таким образом, наблюдение покрытия астероидом звезды надёжного опорного каталога даёт астрометрические данные высокого качества. Наблюдение видимых тесных сближений, за счёт массовости, также позволяет получать высокоточные данные (Vikulova, 2021). Результаты базисных наблюдений покрытия и видимого тесного сближения звезды TYC 1932-469-1 и астероида 87 Sylvia 2019-10-29 продемонстрировали возможность получения координат и расстояния до астероида на уровне точности, отвечающем точности эфемерид. Определение параллакса по базисным измерениям сразу позволяет дать оценку расстояния и вычислить орбиту, зная только первые производные от экваториальных координат. Таким образом, для АСЗ такой подход может дать определяющие результаты наряду с данными радарных измерений. При этом необязательно, чтобы в одном из пунктов наблюдалось именно покрытие. Вполне достаточно наблюдать видимое тесное сближение сразу из двух пунктов. Методика выглядит перспективной в контексте изучения динамики астероидов, в том числе главного пояса (находящихся на довольно больших геоцентрических расстояниях).

## Благодарности

Авторы признательны руководителю ЛНА ГАО РАН А.В.Девяткину и сотруднику ЛНА ГАО РАН Д.Л.Горшанову за предоставленные данные наблюдений астероида 87 Sylvia, полученные на телескопе на МТМ-500М.

## Список литературы

- Lin, C.-L. и др. (2009). *A Close Binary Star Resolved from Occultation by 87 Sylvia*. PASP 121.878, с. 359.
- Wünsche, N. (2020). *A Triple Success - The Occultations by (87) Sylvia and its Moons on 2019 October 29*. Journal for Occultation Astronomy 10.1, с. 3–5.
- Khovrichev, M. Y. и др. (2018). *Searching for Binary Systems Among Nearby Dwarfs Based on Pulkovo Observations and SDSS Data*. Astronomy Letters 44.2, с. 103–118.
- Eggl, S. и др. (2014). *Gaia FUN SSO triangulation observations of 2014 HQ124*. B: Gaia-FUN-SSO-3, с. 71.
- Devyatkin, A. V., D. L. Gorshanov, V. N. L'vov, S. D. Tsekmeister и M. S. Chubey (2016). *Astrometric baseline observations of solar system bodies*. Kinematics and Physics of Celestial Bodies 32.5, с. 241–244.
- Bikulova, D. A. (2021). *Pulkovo observations of apparent close approaches between near-earth asteroids and the Gaia stars in 2019-2020*. Planet. Space Sci. 204, 105245, с. 105245.

## Results of baseline observations of asteroid 87 Sylvia on October 29, 2019

D.A. Bikulova<sup>1</sup>, A.H. Aliev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo

### Abstract

On 29 October 2019 the Pulkovo Observatory observed the occultations of the the star TYC 1932-469-1 (Gaia DR2 Source id = 679856115656562048) by asteroid 87 Sylvia. The observation was made with the one-meter reflector telescope. Simultaneously, the asteroid 87 Sylvia was surveyed using the MTM-500M telescope located at the GAO RAS Mountain Astronomical Station where a visible close approach was observed. Based on this example, the article discusses the possibility of improving the accuracy of ground-based astrometric observations and obtaining «instantaneous» parallaxes to refine the ephemeris by means of baseline observations of the occultations and the apparent close approaches. The paper demonstrates that the method allows to obtain the coordinate accuracy of the order of 0.010 arcsec, which in this case gives a parallax of the asteroid with the accuracy of 0".03 arcsec. Comparison with the existing ephemerides showed a high degree of convergence.